

ORIGINAL ARTICLE

Design of a Compact All-Optical Plasmonic Switch Based on a Nonlinear Resonator for Use in the Third Telecommunication Window

Mohammad Javad Maleki¹, Mohammad Soroosh^{2*}, Ramakrishnan Rajasekar³

1 Postdoctoral Researcher, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2 Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3 Assistant Professor, Department of Electronics and Communication Engineering, SRM Institute of Science and Technology, Tiruchirappalli, India.

Correspondence

Mohammad Soroosh

Email: m.soroosh@scu.ac.ir

How to cite

Maleki, M.J. Soroosh, M. Rajasekar R. (2025). Design of a Compact All-Optical Plasmonic Switch Based on a Nonlinear Resonator for Use in the Third Telecommunication Window, Optoelectronic, 7(2), 55-63.

ABSTRACT

In this research, a new switch based on plasmonic ring resonator is proposed for the third telecommunication window. The designed structure consists of a ring in a silver region, the collar of which is barium oxide with silver nanoparticles, and it is considered a non-linear material. Placing the nonlinear ring at a distance of 10 nm from the waveguide causes the transmitted light power to change the effective refractive index of the ring and changes its resonance wavelength. The dependence of the resonance wavelength of the nonlinear ring on the power of the optical pump causes a change in the interference pattern of the wave inside the ring with the passing signal. This makes the signal transmission efficiency controllable and the structure can be used as an optical switch. The simulation results show that the structure's contrast ratio is equal to 3.85 dB, which is more than that of some previous works. The area of the designed structure is 0.093 μm^2 , which is a special feature compared to previous researches and is required in optical integrated circuits.

KEYWORDS

Surface Plasmon Polariton, Ring Resonator, Kerr Effect, Optical Switch.

فصلنامه علمی
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

طراحی یک سوئیچ فشرده تمام نوری پلاسمونی مبتنی بر تشدیدگر غیرخطی برای استفاده در پنجره سوم مخابراتی

محمد جواد ملکی¹، محمد سروش^{2*}، راماکریشنان راجاسکار³

چکیده

در این پژوهش، یک سوئیچ جدید مبتنی بر تشدیدگر حلقوی پلاسمونی برای پنجره سوم مخابراتی پیشنهاد شده است. ساختار طراحی شده از یک حلقه در بستر نقره تشکیل شده که طوق آن اکسید باریوم با نانو ذره‌های نقره است و ماده‌ای غیرخطی به شمار می‌رود. قرارگیری حلقه غیرخطی در فاصله 10 نانومتر از موجبر باعث می‌شود توان نور عبوری سبب تغییر ضریب شکست موثر حلقه شود و طول موج تشدید آن را تغییر دهد. وابستگی طول موج تشدید حلقه غیرخطی به توان پمپ نوری موجب تغییر در الگوی تداخلی موج درون حلقه با سیگنال عبوری می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که بازده انتقال سیگنال قابل کنترل باشد و بتوان از ساختار به عنوان یک سوئیچ نوری استفاده کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که نسبت تمایز ساختار برابر 3/85 dB است که نسبت به برخی کارهای قبلی بیشتر است. مساحت ساختار طراحی شده، $0/093 \mu\text{m}^2$ است که در مقایسه با پژوهش‌های پیشین یک ویژگی ممتاز به شمار می‌رود و در مدارهای مجتمع نوری مورد نیاز است.

واژه‌های کلیدی

پلاریتون پلاسمون سطحی، تشدیدگر حلقوی، اثر کر، سوئیچ نوری.

1 پژوهشگر پسادکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

2 استاد، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

3 استادیار، دانشکده مهندسی الکترونیک و مخابرات، انستیتو علوم و فناوری SRM، تیروچیراپالی، هند.

نویسنده مسئول:

محمد سروش

رایانامه: m.soroosh@scu.ac.ir

استناد به این مقاله:

محمد جواد ملکی، محمد سروش، راماکریشنان راجاسکار (1403). طراحی یک سوئیچ فشرده تمام نوری پلاسمونی مبتنی بر تشدیدگر غیرخطی برای استفاده در پنجره سوم مخابراتی. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 7(2)، 63-55.

<https://jphys.journals.pnu.ac.ir>

مقدمه

امروزه پژوهش‌های گسترده‌ای در حوزه انتقال پرسرعت اطلاعات در حال انجام است. بسترهای مختلفی مانند بلورهای فوتونی [1-5]، بازوهای ماخ-زندر¹ [6 و 7] و ساختارهای پلاسمونی [8-11] برای طراحی افزاره‌های پرسرعت بررسی شده‌اند. هرچند بلورهای فوتونی و بازوهای ماخ-زندر به دلیل محدودیت‌هایی نظیر ابعاد بزرگ و طول زیاد بازوها، با چالش‌هایی روبه‌رو هستند اما پیشرفت‌های اخیر در حوزه کنترل و انتشار پلاسمون‌های سطحی، نویدبخش توسعه افزاره‌های نوری پلاسمونی بسیار کوچک و سریع است. این دستاوردها می‌توانند تحول عظیمی در زمینه پردازشگرهای نوری و کوانتومی ایجاد کنند.

پلاسمون‌های سطحی به عنوان نوسان‌های جمعی الکترون‌های آزاد در سطح فلز و نیم‌رسانا تعریف می‌شوند [12]. این نوسان‌ها در پاسخ به برانگیختگی ناشی از تابش الکترومغناطیسی (مانند نور) ایجاد شده و به پلاریتون پلاسمون‌های سطحی معروف هستند [13 و 14]. از جمله مزایای استفاده از این پدیده در طراحی افزاره‌های نوری به اندازه بسیار کوچک، محصورسازی قوی نور در اندازه‌های زیر طول موج و امکان کنترل دقیق مسیر انتشار می‌توان اشاره کرد.

سوئیچ‌ها را می‌توان به عنوان ساده‌ترین جزء در افزاره‌ها و مدارهای نوری دانست که کنترل نور را بر عهده دارند. در مدارهای دیجیتال، به سوئیچ‌هایی نیاز است که بتوانند دو حالت روشن و خاموش یا On و Off را پیاده‌سازی کنند. به ازای یک حالت، بخش زیادی از توان نور توسط موجبر انتقال می‌یابد و به درگاه خروجی می‌رسد در حالی که در حالت دیگر، توان نور عبوری بسیار کم است. برای کنترل توان نور عبوری از یک موجبر، تغییر ضریب شکست موثر و تداخل نور گزینه‌های جذابی هستند که به شیوه‌های مختلف پیاده‌سازی می‌شوند.

خانی و همکاران یک سوئیچ پلاسمونی ارائه کردند که از اثر غیرخطی کر برای دستیابی به سازوکار سوئیچینگ استفاده می‌کند و ماده غیرخطی به کار رفته در ساختار، InGaAsP است [15]. ساختار پیشنهادی شامل یک تشدیدگر نانو دیسک متصل به دو موجبر متقاطع است که پالس‌های داده و کنترل به ترتیب به موجبرهای افقی و عمودی اعمال می‌شوند. اختصاص دو موجبر جداگانه برای سیگنال‌های داده و کنترل از تداخل این سیگنال‌ها با یکدیگر جلوگیری می‌کند. بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده، سوئیچ پیشنهادی می‌تواند برای پالس‌های کنترلی تا

3 پیکوثانیه در طول موج 1028 نانومتر به کار رود. بیشینه مقدار عبور 76/8% و مساحت ساختار 1/37 میکرومتر مربع گزارش شده است. پاو و همکاران دو سوئیچ پلاسمونی مبتنی بر موجبرهای پلاسمونی فلز-عایق-فلز با استفاده از استاب‌ها² ارائه کردند [16]. حفره‌های ساختار با ماده غیرخطی Ag:BaO پر شدند و عمل سوئیچینگ به دلیل اثر خود فاز مدولاسیون به دست آمد. ساختار اول می‌تواند با تنظیم شدت نور ورودی یا استفاده از اثر دوپایداری نور در پنجره‌های مخابراتی 1550 نانومتر و 850 نانومتر، به کار رود. در ساختار دوم، با افزودن یک حفره غیرخطی دیگر، یک سوئیچ با دو درگاه طراحی شده است. فاصله زمانی بین روشن و خاموش، 0/25 پیکوثانیه است. اندازه گزارش شده برای ساختار اول و دوم به ترتیب 0/208 نانومتر مربع و 0/248 نانومتر مربع است. ایزوکا³ و همکاران یک سوئیچ نوری مبتنی بر گرافن طراحی کردند که قادر به هدایت کارآمد پلاسمون‌ها با بسامد 30 تراهرتز بین دو موجبر گرافنی متفاوت است [17]. این کار با تنظیم دقیق پتانسیل شیمیایی انجام شد. سوئیچ دارای طول تزویج کوتاه 310 نانومتر در مقایسه با طول کلی افزاره یعنی 280 نانومتر است.

چو⁴ و همکاران یک سوئیچ نوری مبتنی بر گرافن شامل چهار نوار گرافنی پیشنهاد کردند [18]. آن‌ها برای دستیابی به سوئیچینگ، پتانسیل شیمیایی گرافن را در بازه مادون قرمز میانی تغییر دادند. با این حال، یک نقطه ضعف قابل توجه این طراحی، قابلیت تفکیک کم بین حالت‌های روشن و خاموش بود. لی⁵ و همکاران مطالعه جامعی در مورد رفتار نوری غیرخطی یک موجبر گرافنی انجام دادند [19]. آن‌ها موجبر را تحت تأثیر یک پمپ نوری با شدت بالا در بسامد سیگنال 28 تراهرتز قرار دادند. مساحت افزاره 0/25 میکرومتر مربع و نسبت خاموشی 18/14 دسی‌بل است. اویی⁶ و همکاران یک موجبر مبتنی بر گرافن طراحی کردند که می‌تواند نور ورودی را مدوله کند [20]. آن‌ها با استفاده از یک پمپ نوری با شدت بالا، اثرات غیرخطی را برای القای یک شیفت فاز به کار گرفتند. این موجبر در بازه طول موج 10 تا 30 میکرومتر به خوبی کار می‌کند و به شدت نور ورودی 1/5 مگاوات بر سانتی‌متر مربع نیاز دارد که عملی نیست.

مرادیانی و همکاران به بررسی سوئیچ پلاسمونی در طول موج‌های مادون قرمز با استفاده از نانو نوارهای گرافنی تک لایه و چند لایه پرداختند [21]. آن‌ها از تغییر پتانسیل شیمیایی برای

2 Stubs
3 Iizuka
4 Chu
5 Li
6 Ooi

حفاظت از سطح، آسیب‌پذیری و اثرگذاری مستقیم اتصال³ فلزی بر روی آن است که ویژگی‌های گرافن را تغییر می‌دهد. در این پژوهش، با توجه به ابعاد کوچک افزاره از ایده قرارگیری یک حلقه تشدید متشکل از اکسید باریوم با نانوذره‌های نقره در نزدیکی موجبر استفاده شده است. با اعمال پمپ نوری، طول موج تشدید حلقه تغییر می‌کند و می‌توان حالت‌های روشن و خاموش را بر این اساس محقق کرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که تمایز خوبی بین دو حالت روشن و خاموش برقرار است که نسبت تمایز 3/85 dB را نتیجه می‌دهد. مساحت ساختار پیشنهادی برابر $0/093 \mu\text{m}^2$ است که گزینه مناسبی برای به‌کارگیری در مدارهای مجتمع نوری است.

در بخش بعد، ساختار سوئیچ پیشنهادی معرفی می‌شود و چگونگی کار آن بر اساس پمپ نوری بیان می‌شود. همچنین روابط مورد نیاز برای درک عملکرد آن نیز ارائه می‌شوند. در ادامه، نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی و شرایط اولیه آن بحث و بررسی می‌شود. برای درک بهتر کارایی افزاره طراحی شده، نتایج به دست آمده در این کار با کارهای دیگر مقایسه می‌شوند. در بخش آخر نیز جمع‌بندی کوتاهی از این پژوهش ارائه می‌شود.

ساختار سوئیچ پلاسمونی

شکل 1 ساختار سوئیچ پلاسمونی تمام نوری مبتنی بر فلز (نقره)- دی‌الکتریک (هوا)- فلز (نقره) در طیف مادون قرمز نزدیک را نشان می‌دهد. ساختار از یک موجبر هوا با عرض 50 نانومتر برای انتقال سیگنال در راستای محور x استفاده می‌کند که در فاصله d از آن یک حلقه نقره با شعاع r و ضخامت طوق t قرار دارد. طوق این حلقه از اکسید باریوم و نانو ذره‌های نقره با ضریب کر برابر $1/26 \times 10^{-11} \text{ cm}^2 \text{W}^{-1}$ تشکیل شده است و با رنگ سبز در شکل 1 نشان داده شده است [25]. تابش نور به موجبر باعث تحریک و انتشار پلاسمون‌های سطحی در مرکز نقره و هوا می‌شود. نزدیکی حلقه به موجبر باعث می‌شود سیگنال عبوری به حلقه غیرخطی کوپل شود. تداخل سیگنال چرخشی در حلقه با سیگنال درون موجبر باعث تغییر بازده انتقال موجبر می‌شود. زمانی که نور پمپ نیز به درون موجبر تابیده می‌شود توان نوری افزایش می‌یابد و به دلیل اثر غیرخطی کر، ضریب شکست موثر حلقه و طول موج تشدید آن تغییر می‌کنند. این موضوع، الگوی تداخلی بین حلقه و موجبر را تغییر می‌دهد و بر انتقال پلاسمون‌های سطحی توسط موجبر موثر است. می‌توان

تعبیر رسانایی در سطح گرافن استفاده نمودند. با تغییر جزئی در پتانسیل شیمیایی گرافن، جابه‌جایی عمده‌ای در بسامد تشدید و عمق مدولاسیون حاصل شد. نتایج به دست آمده جابه‌جایی قابل توجهی در طول موج حدود 2/8 میکرومتر و عمق مدولاسیون حدود 14 دسی بل را نشان داد. نشان داده شد با کاهش عرض نانو نوارهای گرافنی، مرکز طیف عبور به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شود. لیو¹ و همکاران به بررسی طیف جذب گرافن با حفره پرداختند و یکی از کاربردهای آن را سوئیچ نوری دانستند [22]. آن‌ها تشدید پلاسمونی و جذب 82 درصد توان نور را به ازای تراز فرمی 0/03 الکترون ولت به دست آوردند و از آن برای تحقق حالت‌های روشن و خاموش استفاده کردند. همچنین ضریب شایستگی ساختار مطالعه‌شده، 106 گزارش شده است.

ملکی و همکاران یک سوئیچ الکترواپتیکی مبتنی بر یک موجبر پلاسمونی با محصورسازی بالا پیشنهاد کردند [23]. آن‌ها با استفاده از یک برآمدگی² سیلیکونی زیر یک لایه گرافنی، یک کانال پلاسمونی ایجاد کردند که انتقال سیگنال‌های نوری را بر اساس پتانسیل شیمیایی گرافن کنترل کرد. با اعمال پتانسیل‌های شیمیایی 0/1 الکترون ولت و 0/5 الکترون ولت، تلفات کانال به ازای بسامدهای 25 تراهرتز تا 45 تراهرتز از 78/03 دسی بل بر میکرومتر به 0/23 دسی بل بر میکرومتر تغییر پیدا کرد. اندازه ساختار 0/057 میکرومتر مربع، طول تزویج 218/2 میکرومتر و ضریب شایستگی 1246 گزارش شد. آن‌ها در پژوهشی دیگر یک سوئیچ پلاسمونی مبتنی بر گرافن پیشنهاد کردند تا انتشار پلاریتون‌های پلاسمون سطحی را در یک کانال تراهرتز کنترل کند [24]. کانال پلاسمونی از یک لایه SiO_2 تشکیل شده است که بین یک برآمدگی سیلیکونی و یک لایه گرافن قرار گرفته است. آن‌ها یک لایه نازک طلا روی برآمدگی سیلیکونی قرار دادند تا محصورسازی پلاریتون‌های پلاسمون سطحی را در کانال افزایش دهد. ساختار پیشنهادی دارای مساحت 0/05 میکرومتر مربع است و تلفات کانال و طول تزویج به ترتیب 6/2 دسی بل بر میکرومتر و 9/72 میکرومتر گزارش شده است.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که اندازه ساختار و تمایز حالت روشن و خاموش از مهم‌ترین چالش‌های طراحی سوئیچ‌های نوری است. اگرچه استفاده از گرافن در انتشار پلاسمون‌های سطحی جذابیت‌هایی دارد اما در اندازه‌های کوچک می‌توان از فلزهایی مانند نقره نیز استفاده کرد. یکی از چالش‌های مهم در به‌کارگیری گرافن، اکسید شدن آن و لزوم

1 Liu
2 Ridge

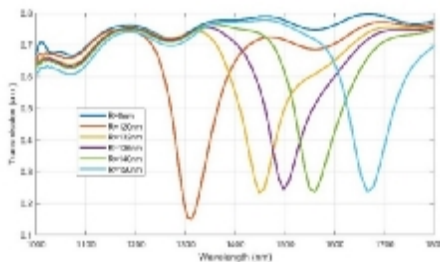
توان تحلیل کرد. گام مکانی را کوچکتر از یک دهم طول موج انتخاب می‌کنند. برای تعیین گام زمانی از شرط کورانت استفاده می‌شود که در رابطه (5) بیان شده است [31].

$$c\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}} \quad (5)$$

c سرعت نور در خلا، Δx ، Δy و Δz اندازه گام مکانی در راستای x، y و z است. در این پژوهش، برای گام مکانی اندازه 0/2 نانومتر و برای گام زمانی 2 اتونانیه در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی ساختار پیشنهادی به شبیه‌سازی اثر شعاع حلقه، ضخامت طوق غیرخطی و فاصله حلقه تشدیدگر تا موجبر بر انتقال پلاسمون‌های سطحی پرداخته می‌شود.

همان طور که در شکل 2 مشاهده می‌شود شعاع حلقه تا 150 نانومتر افزایش یافته است. حالت $R=0$ بیان کننده این موضوع است که حلقه‌ای وجود ندارد. به ازای $d=10$ nm و $t=30$ با تغییر شعاع حلقه از 120 تا 150 نانومتر، دره انتقال³ از 0/153 به 0/239 و طول موج متناظر آن از 1315 نانومتر به 1669 نانومتر جابه‌جا می‌شود. با افزایش شعاع حلقه، طول موج تشدید حلقه نیز افزایش می‌یابد چون ضریب شکست موثر حلقه ($n_{\text{eff-r}}$) افزایش می‌یابد و بر اساس رابطه (6) طول موج تشدید (λ_r) نیز بیشتر می‌شود. m عدد صحیح است که شماره مدهای تشدید درون حلقه را توصیف می‌کند. تشدید در حلقه باعث شکل‌گیری الگوی مخرب قوی شده و از عبور امواج پلاسمونی جلوگیری می‌کند. دره‌های ایجاد شده در شکل 2، حالت تشدید در حلقه را نشان می‌دهند. به خوبی می‌توان مشاهده کرد که با تغییر شعاع حلقه، طول موج تشدید و قدرت تخریب حلقه بر سیگنال عبوری از موجبر تغییر می‌کند [32].

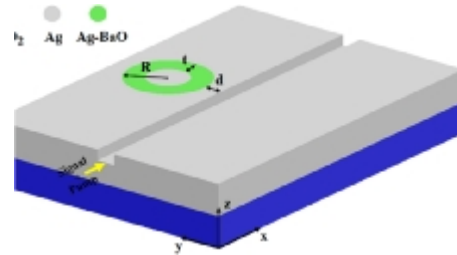
$$\lambda_r = \frac{2\pi R n_{\text{eff-r}}}{m} \quad (6)$$



شکل 2. طیف انتقال پلاسمون‌های سطحی به ازای تغییر شعاع حلقه تشدیدگر.

شکل 3 نشان می‌دهد با فرض ثابت بودن شعاع حلقه (nm)

گفت با تغییر توان پمپ، شعاع و طوق حلقه می‌توان طول موج تشدید حلقه و در نتیجه، بازده انتقال پلاسمون‌ها را تنظیم کرد.



شکل 1. نمای دو بعدی سوئیچ پلاسمونی تمام نوری با استفاده از تشدیدگر حلقوی غیر خطی.

برای شبیه‌سازی از مدل درود¹ استفاده شده است و ضریب دی‌الکتریک به صورت زیر تعریف می‌شود [26 و 27]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\gamma\omega} \quad (1)$$

ω بسامد رادیانی، ε_{∞} ضریب گذردهی، ω_p بسامد پلاسما و γ ثابت میرایی است [26 و 27]. ثابت انتشار مدهای عرضی با رابطه (2) محاسبه می‌شود [28 و 29].

$$\beta_{\text{wg}} = \frac{n_{\text{eff}} \times 2\pi}{\lambda} \quad (2)$$

ضریب شکست موثر موجبر فلز-عایق-فلز به صورت زیر تعریف می‌شود که ε_m گذردهی فلز و ε_d گذردهی دی‌الکتریک است [28 و 29].

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{\varepsilon_d} \left(1 + \frac{\lambda}{\pi w_{\text{wg}} \sqrt{-\varepsilon_m}} \sqrt{1 + \frac{\varepsilon_d}{-\varepsilon_m}} \right)^{0.5} \quad (3)$$

بر اساس تئوری مود کوپل، بازده انتقال مود عرضی در موجبر با رابطه (4) تعریف می‌شود [30].

$$T(\omega) = \frac{\left((\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{1}{\zeta_i} - \frac{1}{\zeta_0} \right)^2 \right)}{\left((\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{1}{\zeta_i} + \frac{1}{\zeta_0} \right)^2 \right)} \quad (4)$$

ω_0 بسامد تشدید حلقه، $\frac{1}{\zeta_i}$ تلفات ذاتی و $\frac{1}{\zeta_0}$ تلفات کوپل موجبر است.

شبیه‌سازی و نتایج

برای شبیه‌سازی افزاره پیشنهادی از نرم‌افزار لومریکال و روش تفاضل محدود حوزه زمان² استفاده شده است. گام‌های مکانی باید به اندازه کافی کوچک باشند تا کوچک‌ترین عنصر در ساختار قابل شناسایی باشد. همچنین فاصله بین گام‌های مکانی باید به اندازه کافی کوچک باشد تا کوتاه‌ترین طول موج بررسی شده را

1 Drude

2 Finite Difference Time Domain (FDTD)

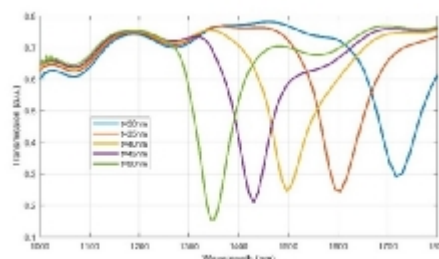
ثابت هستند به پارامتر دیگری برای دستیابی به سوئیچ نوری نیاز است. اثر غیرخطی کر بیان می‌کند که با تابش نور با طول موج‌های پایین‌تر از سیگنال اصلی و جذب آن می‌توان ضریب شکست محیط غیرخطی را تغییر داد. همان طور که در شکل 1 توضیح داده شده است در طوق حلقه از اکسید باریوم با نانو ذره‌های نقره استفاده شده است که، ماده‌ای حساس به نور و غیرخطی است. در این پژوهش، برای پمپ نوری از لیزر 820 نانومتر با شدت 220 میلی وات بر میکرومتر مربع استفاده می‌شود. با کاهش طول موج نور، انرژی فوتون‌های مربوط به آن به عنوان بسته‌های انرژی می‌تواند بر اثر جذب به ماده غیرخطی منتقل شود. فاصله 10 نانومتری حلقه از موجبر به خوبی اثر پمپ بر طوق غیرخطی را تضمین می‌کند.

برای بررسی اثر پمپ، با فرض $d=10$ nm و $t=40$ nm دو حالت مختلف به ازای $R=132$ nm و $R=136$ nm شبیه‌سازی می‌شوند. برای این که از راهیابی سیگنال پمپ به خروجی موجبر جلوگیری شود می‌توان از یک حلقه تشدید با طوق هوا به شعاع 95 نانومتر در فاصله 10 نانومتر از انتهای موجبر استفاده کرد. دو سازوکار مختلف برای سوئیچ می‌تواند رخ دهد بدین صورت که اعمال پمپ و تغییر طول موج تشدید حلقه باعث تولید حالت خاموش یا روشن سوئیچ شود. در سازوکار اول که در شکل 5 نشان داده شده است اعمال پمپ باعث تولید حالت خاموش می‌شود در حالی که در شکل 6 با اعمال پمپ، حالت روشن ایجاد می‌شود.

شکل 5 طیف خروجی موجبر را به ازای دو حالت روشن و خاموش بودن پمپ و $R=132$ nm نشان می‌دهد. در این شکل، توزیع مکانی میدان مغناطیسی در صفحه xy نیز نشان داده شده است. بدون اعمال پمپ و تنها با اعمال سیگنال نور ورودی، در طول موج مرکزی 1565 نانومتر تشدید رخ نمی‌دهد و 58/2% سیگنال پلاسمونی به انتهای سوئیچ می‌رسد و افزاره در حالت روشن قرار می‌گیرد. با اعمال پمپ 820 نانومتر، حلقه غیرخطی تحریک می‌گردد و این تحریک موجب جابه‌جایی طول موج تشدید به 1565 نانومتر می‌شود. بنابراین؛ تشدید در طول موج 1565 نانومتر رخ می‌دهد و 24% توان نور به انتهای موجبر می‌رسد. در نتیجه، سوئیچ در حالت خاموش قرار می‌گیرد.

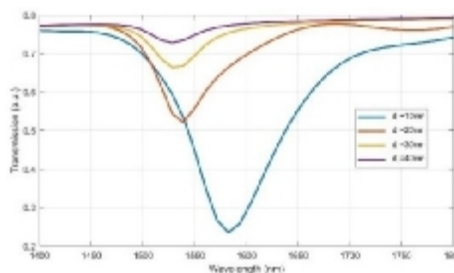
شکل 6 طیف انتقالی به ازای $R=136$ nm را نشان می‌دهد. در این حالت، حلقه در حالت بدون اعمال پمپ در وضعیت تشدید تنظیم شده است و فقط 24% سیگنال ورودی به ازای طول موج 1550 نانومتر به انتهای موجبر می‌رسد و حالت خاموش برای سوئیچ لحاظ می‌شود. با اعمال پمپ، طول موج تشدید حلقه به 1604 نانومتر تغییر می‌کند بنابراین؛ 59/1 درصد سیگنال به درگاه خروجی سوئیچ می‌رسد. این حالت به عنوان روشن در نظر گرفته می‌شود.

افزایش ضخامت حلقه تشدیدگر باعث کاهش ضریب شکست موثر حلقه می‌شود بنابراین؛ مطابق رابطه (6)، طول موج تشدید کاهش می‌یابد. این موضوع با جابه‌جایی دره‌ها در شکل 3 نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ضخامت طوق از 30 به 50 نانومتر، دره انتقال از 0/292 به 0/161 جابه‌جا می‌شود و طول موج متناظر دره از 1724 نانومتر به 1348 نانومتر تغییر می‌یابد.



شکل 3. ضریب انتقال پلاسمون‌های سطحی بر حسب طول موج به ازای تغییر ضخامت طوق حلقه تشدید.

بر اساس شکل 4 با افزایش فاصله حلقه تشدیدگر تا موجبر، طول موج تشدید کاهش یافته و اندازه ضریب انتقال به ازای طول موج‌های تشدید کمتر می‌شود. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فاصله از 10 تا 40 نانومتر، دره انتقال از 0/241 به 0/732 تغییر می‌کند و طول موج دره از 1583 نانومتر به 1529 نانومتر جابه‌جا می‌شود. هرچه فاصله حلقه از موجبر کمتر می‌شود تداخل ایجاد شده بین این دو بیشتر می‌شود و اثر حلقه بر امواج پلاسمونی عبوری از موجبر بیشتر می‌شود. به نظر می‌رسد فاصله 10 نانومتر برای فاصله مذکور مناسب باشد و در این فاصله، به ازای تشدید در 1583 نانومتر ضریب انتقال حدود 24/1 درصد است.



شکل 4. توزیع طیف ضریب انتقال پلاسمون‌های سطحی به ازای تغییرات فاصله حلقه تشدید تا موجبر.

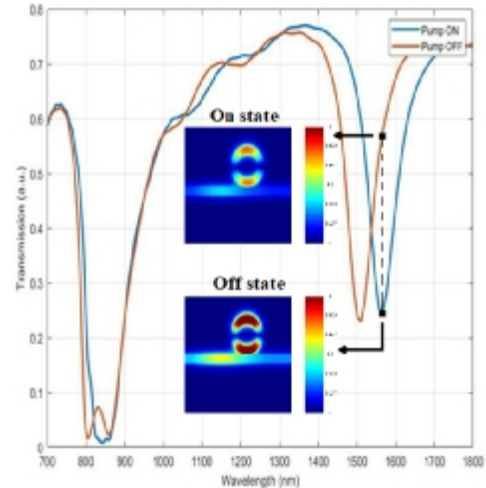
شکل‌های 2 و 3 نشان می‌دهند که با تغییر شعاع حلقه و ضخامت طوق می‌توان طول موج تشدید را به دلخواه تنظیم کرد. از آنجایی که این دو پارامتر برای افزاره‌ای که ساخته شده است

برای آن که بتوان درک بهتری از عملکرد ساختار پیشنهادی به دست آورد ضروری است که نتایج به دست آمده با نتایج پژوهش‌های مرتبط مقایسه شوند. جدول 1 نسبت تمایز، جابه‌جایی طول موج تشدید و مساحت افزارها را ارائه می‌دهد و سازوکار به کار رفته در آن‌ها را نیز نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که در مقایسه با افزارهای مبتنی بر اثر کر، ساختار پیشنهادی مساحت ناحیه فعال کمتری دارد که این ویژگی در مدارهای مجتمع نوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه ساختارهای مبتنی بر گرافن، عموماً اندازه کوچک‌تری دارند اما وابستگی شدید دمایی آن‌ها، اکسیداسیون گرافن و لزوم استفاده از لایه محافظ چالش‌های قابل توجهی هستند. در مراجع [19,21,23,24] از اثر اتصال بایاس به تک لایه گرافنی صرفه‌نظر شده است در حالی که این اتصال اثر قابل توجهی بر ویژگی‌های الکتریکی و نوری گرافن دارد. برای غلبه بر این اثر، مساحت لایه نازک گرافن را بیشتر انتخاب می‌کنند تا نقطه اتصال بیش از 50 نانومتر از ناحیه موجبری فاصله داشته باشد. واضح است که با لحاظ کردن این موضوع کاربردی، اندازه ساختار طراحی شده از افزارهای مبتنی بر گرافن فوق کوچک‌تر خواهد شد.

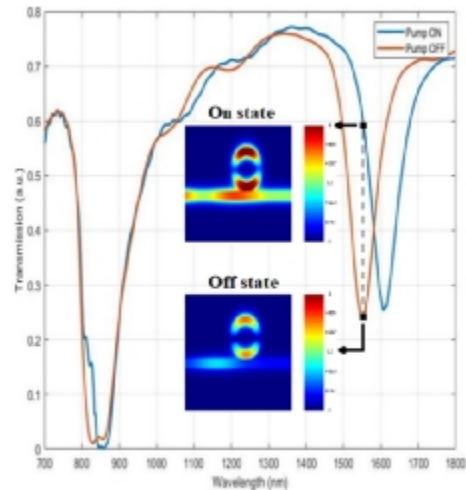
نسبت تمایز یکی از پارامترهای مهم برای تفکیک حالت‌های منتسب به «یک» و «صفر» دیجیتالی است که در افزارهای منطقی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. با مقایسه مقادیر ارائه شده در جدول 1 می‌توان دید که نسبت تمایز طرح پیشنهادی نتایجی نزدیک به کارهای دیگران دارد. جابه‌جایی طول موج تشدید نیز می‌تواند به عنوان یک پارامتر مهم ارزیابی شود چون هرچه این جابه‌جایی بیشتر باشد، نشان می‌دهد که ساختار نسبت به شدت پمپ نوری حساس‌تر است. این ویژگی در کاربردهای حسگری بسیار قابل توجه است.

اگر به‌طور کلی سوئیچ‌های مبتنی بر گرافن با سوئیچ‌های اثر کر مقایسه شوند یک تفاوت مهم آشکار خواهد شد. افزارهای گرافنی که در مراجع [19,21,23,24] معرفی شده‌اند ساختار الکترواپتیکی دارند و با بایاس الکتریکی کار می‌کنند اما ساختار مبتنی بر اثر کر به صورت مستقیم با بخش الکترونیک ارتباطی ندارد و بر اساس سازوکار حاکم، می‌توان آن را افزاره تمام‌نوری نامید. این ویژگی را نیز می‌توان به عنوان یک مزیت برای ساختار طراحی شده در نظر گرفت.

شکل‌های 5 و 6 نشان می‌دهند که سوئیچ طراحی شده در پنجره مخابراتی سوم و باندهای C و L کار می‌کند که، تطابق خوبی با سامانه‌های مبتنی بر فیبر نوری دارد. بنابراین؛ می‌توان از ساختار پایه پیشنهادی در مدارهای مرتبط با سامانه مخابرات



شکل 5. ضریب انتقال به ازای شعاع حلقه تشدیدگر 132 نانومتر برحسب طول موج و دو حالت پمپ روشن و پمپ خاموش. توزیع میدان مغناطیسی در صفحه xy به ازای دو حالت گفته شده نشان داده شده‌اند.



شکل 6. طیف انتقالی ساختار پیشنهادی به ازای $R=136$ nm و دو حالت روشنی و خاموشی پمپ. به ازای دو حالت روشن و خاموش، توزیع میدان مغناطیسی در صفحه xy رسم شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده در شکل‌های 5 و 6 می‌توان نسبت تمایز دو حالت روشن و خاموش یا On و Off را محاسبه کرد. کمترین مقدار خروجی به ازای حالت روشن (M1) برابر 0/582 و بیشترین اندازه به‌هنگار شده خروجی به ازای حالت خاموش (M0) برابر 0/24 است. بر اساس رابطه (7) می‌توان نسبت تمایز On و Off را محاسبه کرد که این مقدار برابر 3/85 dB است [33].

$$CR=10\log\left(\frac{M1}{M0}\right) \quad (7)$$

نوری نیز بهره برد. پهنای باند وسیع و کیفیت ممتاز پردازش سیگنال‌های نوری بر اهمیت طراحی بلوک‌های سازگار با پنجره‌های مخابراتی دلالت دارد. به نظر می‌رسد با توجه به اندازه کوچک ساختار و قابلیت تفکیک مناسب سطوح منطقی صفر و یک، بتوان سوئیچ طراحی شده را به عنوان یک بلوک پایه و کارآمد تلقی کرد.

جدول 1. مقایسه ساختار پیشنهادی با ساختارهای ارائه شده در پژوهش‌های پیشین.

مرجع	CR (dB)	جابجایی طول موج تشدید (nm)	مساحت (μm^2)	سازوکار
[15]	3/47	27	1/37	اثر کر
[16]	4/05	53	0/446	اثر کر
[19]	5/35	-	0/25	تغییر پتانسیل گرافن
[21]	2/74	-	0/42	تغییر پتانسیل گرافن
[23]	4/79	-	0/057	تغییر پتانسیل گرافن
[24]	5/34	-	0/05	تغییر پتانسیل گرافن
این پژوهش	3/85	66	0/093	اثر کر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سوئیچ تمام نوری پلاسمونی مبتنی بر ساختار فلز- نیم رسانا- فلز طراحی شده است. ساختار پیشنهادی از یک موجبر پلاسمونی و یک حلقه تشدید غیرخطی تشکیل شده است. طوق حلقه از اکسید باریم با نانو ذره‌های نقره در نظر گرفته شده است که ضریب شکست آن و طول موج تشدید حلقه بر اساس توان نور تغییر می‌کند. فاصله 10 نانومتری حلقه از موجبر امکان تداخل امواج را فراهم می‌سازد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نسبت تمایز افزاره برابر 3/85 dB است و این نتیجه در مساحت کوچک $0/093 \mu\text{m}^2$ به دست آمده است. کوچک بودن ساختار که یک بلوک پایه در مدارهای دیجیتال محسوب می‌شود کارآمدی آن در مدارهای مجتمع نوری را نشان می‌دهد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش توسط دانشگاه شهید چمران اهواز به شماره پژوهانه SCU.EE1402.672 حمایت شده است. نویسندگان مراتب قدردانی خود را بابت حمایت مذکور اعلام می‌دارند.

References

- [1] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, S. S. Dhanabalan, High-performance 2-to-4 decoder using nonlinear ring resonators in photonic crystal platform, *Optical and Quantum Electronics* 56 (2024) 1480.
- [2] M. J. Maleki, M. Soroosh, A. Mir, Improving the performance of 2-to-4 optical decoders based on photonic crystal structures, *Crystals* 12 (2019) 635.
- [3] M. Zavvari, F. Mehdizadeh, Photonic crystal cavity with L3-defect for resonant optical filtering, *Frequenz* 68 (2014) 519-23.
- [4] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, F. Parandin, F. Haddadan, Photonic Crystal Resonators in Designing Optical Decoders, *Journal of Optoelectronic Nanostructures* 8 (2023) 1-24.
- [5] M. J. Maleki, M. Soroosh, F. Parandin, F. Haddadan, Photonic crystal-based decoders: ideas and structures. In *Recent Advances and Trends in Photonic Crystal Technology, IntechOpen*, 1st edition, (2023).
- [6] A. A. Kashi, J. J. G. M. van der Tol, M. S. Lebbby, X. Zhang, K. Williams and Y. Jiao, Ring-Assisted Mach-Zehnder Modulator on the InP Membrane on Silicon Platform, *Journal of Lightwave Technology* 42 (2024) 4553-4562.
- [7] H. Yang, J. Li, X. Man, Z. Yin, Y. Wang, P. Hu, Operating point control method for the Mach-Zehnder modulator in a phase-shift laser range

منابع

- finder, *Optics Express* 32 (2024) 19881-19894.
- [8] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, Low-Loss Optical Decoder for Surface Plasmon Polariton Transmission, *9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM)*, Mazandaran (2024).
- [9] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, A compact low-loss 2-to-4 plasmonic decoder based on suspended graphene for surface plasmon polariton transmission, *Diamond and Related Materials* 144 (2024) 110983.
- [10] R. Rahad, M. A. Haque, M. O. Faruque, A. S. Mohsin, M. S. Mobassir, R. H. Sagor, A novel plasmonic MIM sensor using integrated 1×2 demultiplexer for individual lab-on-chip detection of human blood group and diabetes level in the visible to near-infrared region, *IEEE Sensors Journal* 24 (2024) 12034-12041.
- [11] H. R. Das, H. Mondal, Investigation of plasmonic material-based T-shaped high extinction ratio electro-absorption modulator with different dielectric materials, *Optik* 313 (2024) 171985.
- [12] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, A subwavelength graphene surface plasmon polariton-based decoder, *Diamond and Related Materials* 134 (2023) 109780.
- [13] M. J. Maleki, M. Soroosh, F. Haddadan, Graphene-Based Optical Waveguides for Surface

- Plasmon Polariton Transmission. In *Optical Waveguide Technology and Applications, IntechOpen*, 1st edition, (2024).
- [14] M. J. Maleki, M. Soroosh, A low-loss subwavelength plasmonic waveguide for surface plasmon polariton transmission in optical circuits, *Optical and Quantum Electronics* 55 (2023) 1266.
- [15] S. Khani, M. Danaie, P. Rezaei, Realization of a plasmonic optical switch using improved nano-disk resonators with Kerr-type nonlinearity: a theoretical and numerical study on challenges and solutions, *Optics Communications* 477 (2020) 126359.
- [16] M. Pav, S. Pooretamad, N. Granpayeh, Ultra-fast all-optical plasmonic dual-band nonlinear off-on and two-port switches, *Plasmonics* 19 (2024) 111-121.
- [17] H. Iizuka, S. Fan, Deep subwavelength plasmonic waveguide switch in double graphene layer structure, *Applied Physics Letters* 103 (2013) 233107.
- [18] H. S. Chu, C. How Gan, Active plasmonic switching at mid-infrared wavelengths with graphene ribbon arrays, *Applied physics letters* 102 (2013) 231107.
- [19] J. Li, J. Tao, Z. H. Chen, X. G. Huang, All-optical controlling based on nonlinear graphene plasmonic waveguides, *Optics express* 24 (2016) 22169-22176.
- [20] K. J. Ooi, J. L. Cheng, J. E. Sipe, L. K. Ang, D. T. Tan, Ultrafast, broadband, and configurable midinfrared all-optical switching in nonlinear graphene plasmonic waveguides, *APL Photonics* 1 (2016) 046101.
- [21] F. Moradiani, M. Seifouri, K. Abedi, Design and Analysis of Plasmonic Switch at mid-IR Wavelengths with Graphene Nano-Ribbons, *Journal of Research on Many-body Systems* 8 (2018) 101-105.
- [22] Z. Liu, J. Zhou, X. Liu, G. Fu, G. Liu, C. Tang, J. Chen, High-Q plasmonic graphene absorbers for electrical switching and optical detection, *Carbon* 166 (2020) 256-264.
- [23] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, Design and simulation of compact subwavelength electro-optic switch based on graphene surface plasmon polaritons, *Biquarterly Journal of Optoelectronic* 6 (2023) 41-50.
- [24] M. J. Maleki, M. Soroosh, F. K. AL-Shammri, A. G. Alkhayer, H. Mondal, Design and Simulation of a Compact Subwavelength Graphene-Based Switch for Surface Plasmon Polariton Transmission in Integrated Optoelectronic Circuits, *Plasmonics*, Published online (2024) 1-13.
- [25] Z. Zhang, J. Yang, X. He, Y. Han, J. Zhang, J. Huang, D. Chen, S. Xu, All-optical multi-channel switching at telecommunication wavelengths based on tunable plasmon-induced transparency, *Optics Communications* 425 (2018) 196-203.
- [26] P. Mulvaney, Surface plasmon spectroscopy of nanosized metal particles, *Langmuir* 12 (1996) 788-800.
- [27] E. D. Palik, Handbook of optical constants of solids, *Academic press* 3 (1998).
- [28] S. Collin, F. Pardo, J. L. Pelouard, Waveguiding in nanoscale metallic apertures, *Optics Express* 7 (2007) 4310-4320.
- [29] J. Park, H. Kim, B. Lee, High order plasmonic bragg reflection in the metal-insulator-metal waveguide bragg grating, *Optics Express* 16 (2008) 413-425.
- [30] Q. Li, T. Wang, Y. K. Su, M. Yan, M. Qiu, Coupled mode theory analysis of mode-splitting in coupled cavity system, *Optics Express* 18 (2010) 8367-8382.
- [31] M. J. Maleki, M. Soroosh, An ultra-fast all-optical 2-to-1 digital multiplexer based on photonic crystal ring resonators, *Optical and Quantum Electronics* 54 (2022) 397.
- [32] W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh, K. De Vos, S. Kumar Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. Van Thourhout, R. Baets, Silicon microring resonators, *Laser & Photonics Reviews* 6 (2012) 47-73.
- [33] M. J. Maleki, M. Soroosh, G. Akbarizadeh, Design and Simulation of Compact Plasmonic Decoder with High Contrast Ratio for Propagation of Graphene Surface Plasmon Polaritons, *Quarterly Journal of Optoelectronic* 6 (2023) 11-18.